

# 道路舗装下におけるコラムースラブ系基礎の応力分担について

藤川和之  
沈 水龍

(株)親和テクノ佐賀支店  
佐賀大学低平地研究センター

## 1. まえがき

軟弱地盤上に造られた低盛土道路は、交通荷重の影響を受けやすく交通解放後に沈下が長期間続くことになる<sup>1),2)</sup>。杭で支持されたボックスカルバートなどは横断構造物と道路との接合部において段差<sup>3)</sup>を発生することが多い。この段差は車両の走行性を著しく阻害し、交通振動や騒音の発生源となる。これらの沈下や段差を緩和するために、コラムアプローチ工法<sup>3)</sup>およびコラムシステム工法<sup>4),5)</sup>を提案した。本研究ではフローティング形式でソイルセメントコラムを打設した時の挙動に関する実験および有限要素法解析を行い、コラムと周辺粘土地盤の応力分担について検討する。

## 2. 室内モデル実験

図-1に実験装置を示している。プラスチック円筒容器（内径348mm、高さ440mm）にスラリー状の有明粘土を投入しつつ、土圧計と間隙水圧計を予定位置にひもでつるして固定した。約20kPaの圧密圧力を加え、上下排水条件で15日間放置した。有明粘土の初期物性は含水比 $w_n=140\sim150\%$ 、液性限界 $w_L=104\%$ 、塑性限界 $w_p=63\%$ 、土粒子密度 $\rho_s=2.62$ 、粘土分59.1%、シルト分39.8%、砂1.1%である。円筒内壁の摩

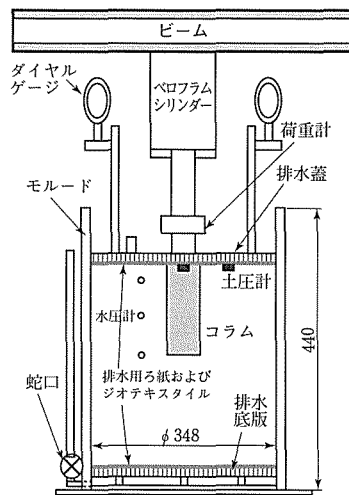


図-1 実験装置 単位：mm

擦を減じるために、グリスを塗りサラップでカバーした。圧密終了後の含水比は105~125%、せん断強度は6.2~8.7kPaであった。

模型地盤に、モデルコラム打設装置<sup>6)</sup>を用いて、ソイルセメントコラム（セメント添加量 $2\text{ kN/m}^3$ 、水セメント比 $W/C=100\%$ ）を打設した。所定日数養生の後、地盤表面に土圧計を設置し、圧密を行った。荷重は $3.5\rightarrow19.6\rightarrow31.7\text{ kPa}$ と1日ごとに上げていき、 $49.6\text{ kPa}$ で圧密が完了するまでかけた。圧密に伴って、沈下量、間隙水圧、垂直土圧を実測し、FEM解析値と比較検討した。実験ケースおよび実験条件は

表-1に示している。

### 3. 解析方法およびパラメータ

道路の合計厚さは路床 CBR および交通量によって決定する<sup>7),8)</sup>。軟弱地盤中にコラムを打設して不均一な複合地盤を造成するので、交通荷重による舗装のたわみは均一地盤より大きくなる。これを防ぐために舗装とコラムの間にスラブを設置する。図-2に示す系の挙動は、FEMで軸対称のユニットセルモデルを用いて解析する<sup>9)</sup>(図-3)。

ユニットセルにかかる荷重(スラブ表面に作用する荷重 $\sigma$ )は、舗装自重および交通荷重である。ここで交通荷重の大きさおよびその影響深さ $Z_r$ の評価は、三浦ら<sup>2)</sup>が実測値に基づいて以下の計算式(1)(2)で与えられる換算交通荷重強度 PT および影響深さ $Z_r$ を用いて設計を行う。

$$P_r = \exp(4.62 - 0.47t_{top}) \quad (1)$$

$$Z_r = \exp(2.31 - 0.47t_{top}) \quad (2)$$

軸対称の応力条件で、室内実験の場合は高さ35.9cm、幅17.4cmの範囲で、現場地盤対称は深さ20m、幅0.5~2mの範囲での有限要素モデルを用いた。地盤モデルとして、粘土層は修正カムクレイモデル、プラスチック載荷板や舗装-スラブ-改良コラムは Mohr-Coulomb の破壊基準による弾性モデルを用いた。解析では FEM プログラム CRISP-AIT<sup>10),11)</sup>を用いて行った。

室内実験に関する解析パラメータは次の値を用いた。再圧密粘土は単位重量 $\gamma_r = 13.7 \text{ kN/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.35$ 、 $\lambda = 0.36$ 、 $\kappa = 0.056$ 、初期間隙比 $e_0 = 3.2$ 、水平、垂直透水係数 $k_h, k_v = 2.3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、改良粘土は $\gamma_r = 13.7 \text{ kN/m}^3$ 、 $\nu = 0.3$ 、ヤング弾性係数 $E = 172 \text{ MPa}$ であり、プラスチック版は $\gamma_r = 16.0 \text{ kN/m}^3$ 、 $\nu = 0.25$ 、 $E = 18000 \text{ MPa}$ であった。地盤の初期応力状態はモデル地盤を作るための圧密圧力 $20 \text{ kPa}$ を用いた。

表-1 実験ケースおよび実験条件

ケース	$d_c$ (cm)	$A_s$ (%)	$q_{scot}$ (kPa)	$L/d_c$ $H_d$ (cm)	$H_s$ (cm)
1	10	8.3	925	2.6 (25.8)	35.9
2	10	8.3	905	3.2 (32.2)	35.5

Note:  $D_{col}$ =コラム直径,  $A_s$ =改良率,  $q_{scot}$ =コラムの一軸強度,  $R_{sd}=H_d/H_s$ =貫通比,  $H_d$ =コラム長さ,  $H_s$ =地盤厚さ。

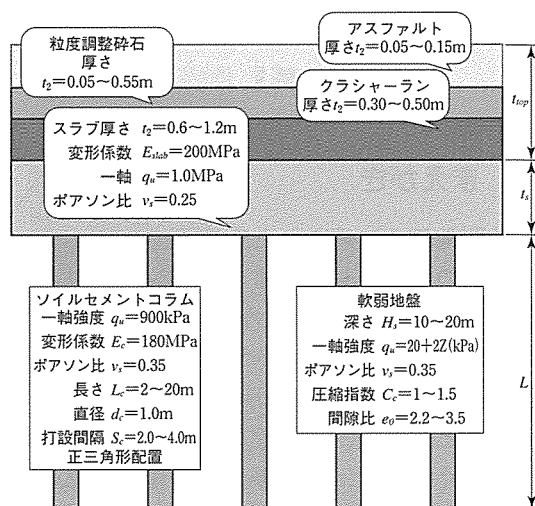


図-2 舗装およびコラムスラブ

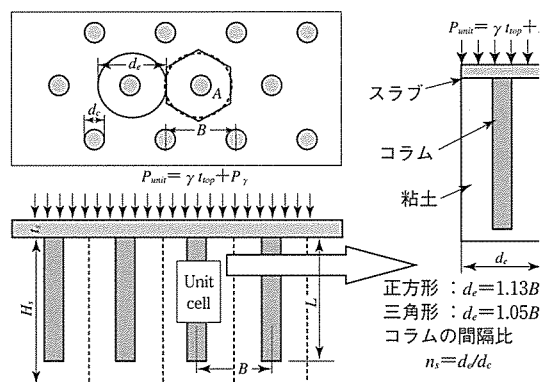


図-3 解析モデル化

このようなパラメータに基づく、粘土のせん断強度の予測値は $7.5 \text{ kPa}$ であり、実験とよく合った。

現場地盤条件に関する解析パラメータは次のような値を用いた。軟弱粘土は単位重量 $\gamma_r = 14 \sim 15 \text{ kN/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.35$ ,

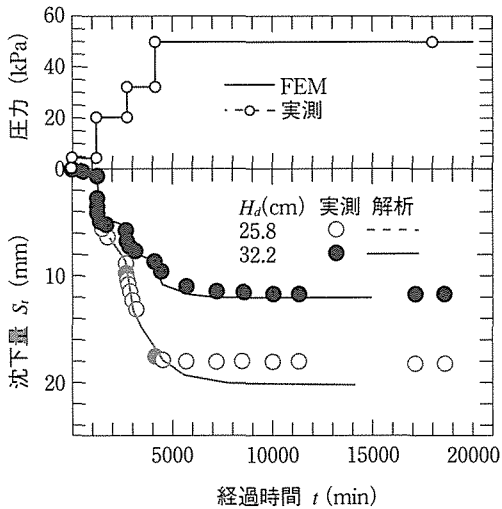


図-4 荷重、沈下と経過時間の関係

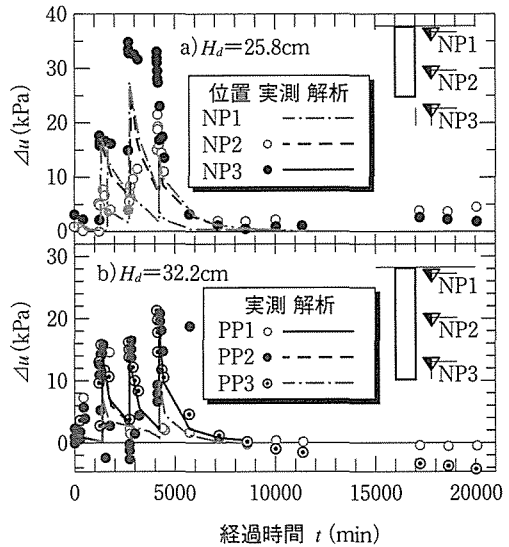


図-5 過剰間隙水圧と経過時間の関係

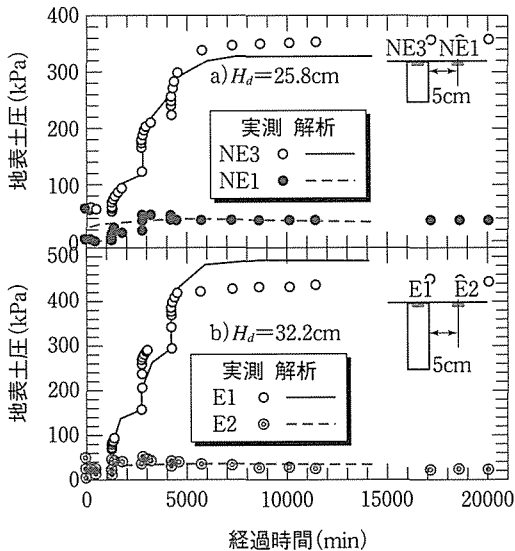


図-6 地表土圧と経過時間の関係

$\lambda=0.55$  (0~10m), 0.65 (10~20m),  $\kappa=0.055$  (0.066), 初期間隙比  $e_0=2.5\sim 3.2$ , 限界応力比  $M=1.2$ , 水平, 垂直透水係数  $k_h, k_v=2.3\times 10^{-7}$ cm/s), 改良粘土は  $\gamma_t=14.5$ kN/m<sup>3</sup>,  $\nu=0.3$ , ヤング弾性係数  $E=180$ MPa であり, スラブは  $\gamma_t=15.5$ kN/m<sup>3</sup>,  $\nu=0.25$ ,  $E=200$ MPa の値を用いた. 解析における地盤の初期応力状態は軟弱地盤を正規圧密粘土とした. 解析に用いた圧密降伏圧力  $p'_c=20\sim 85$ kPa, スラブ厚さは

$t_s=0.1\sim 1$  m とした.

#### 4. 解析結果および考察

図-4 には, 荷重-経過時間, 沈下量-経過時間関係を示している. 沈下量においては, 実験値と解析値はほぼ一致しており, 改良地盤より無改良地盤の方が大きく, 改良地盤の中では, コラムが短いほど沈下が大きいたことが分かる. 図-5 には, 過剰間隙水圧の上昇-消散挙動を示している. 解析値と実測値との差は沈下量の場合より大きい, 過剰間隙水圧の上昇-消散傾向は概ねよくシミュレートしている. コラム周辺に生じた過剰間隙水圧は, コラム長が短い方が大きくなった. 過剰間隙水圧の消散はかなり速く, 載荷後1000分で90%が消散した. 図-6 には, 地表土圧-経過時間関係を示している. 解析は実測値をよくシミュレートしている. 初期1000分間は, 改良体の表面土圧は増加しているが, 粘土の表面土圧は減少している. また, コラムにおける垂直応力は, コラム中心から離れるほど小さくなる.

コラムの応力分担比  $n$  は, スラブ直下に

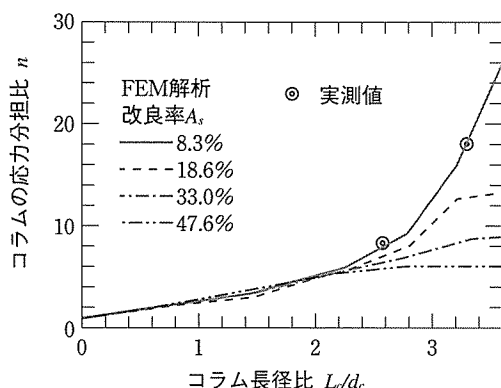


図-7 応力分担比とコラム長径比の関係

においてコラムおよび粘土に作用する平均垂直応力  $\sigma_{v(column)}$  と  $\sigma_{v(clay)}$  の比であり、次式で表される。 $n = \sigma_{v(column)} / \sigma_{v(clay)}$  (3)

図-7に示しているのは、コラムの長さ $L$ と直径 $d_c$ の比  $R_{Ld}$  (以下長径比と称する、 $R_{Ld} = L/d_c$ 、ここに、 $L$ =コラムの長さ、 $d_c$ =コラムの直径)、改良率  $A_s$  と応力分担比  $n$  の相互関係である。コラムが着底の場合 (長径比  $R_{Ld}=3.6$ ) では、改良率  $A_s < 10\%$  時に、応力分担比  $n=25$  である。コラムがフローティングの場合は、長径比  $R_{Ld}$  の減少とともに応力分担比も小さくなる。また、モデルが小さいおよび初期応力が大きいので、 $R_{Ld} < 2.3$  の場合、 $n$  は改良率  $A_s$  との関係はなく、 $R_{Ld}$  の増加により  $n$  がほぼ直線的に増加している。 $R_{Ld} > 2.3$  の場合には、 $A_s$  の増加により  $n$  が減少することがわかった。以上より、コラムスラブ系の応力分担は、有限要素解析が室内実験値をよくシミュレートできる。実際には、室内実験のような小さい長径比は現場では有りえないが、以下、有限要素解析を用いて、現場地盤条件でコラムの応力分担について考察する。

コラム-周辺粘土の応力分担比にはいくつかの要因が関与している。弾性解析によると、荷重の大きさ、改良率、長径比、スラブの厚さなどが最も重要である。本解析は粘土の弾塑性理論に基づいてコラムアブ

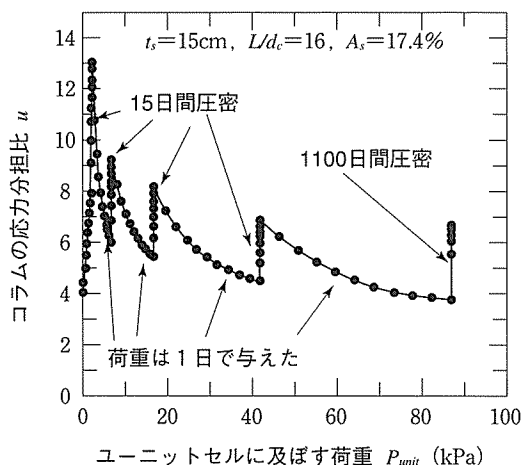


図-8 荷重と応力分担比の関係

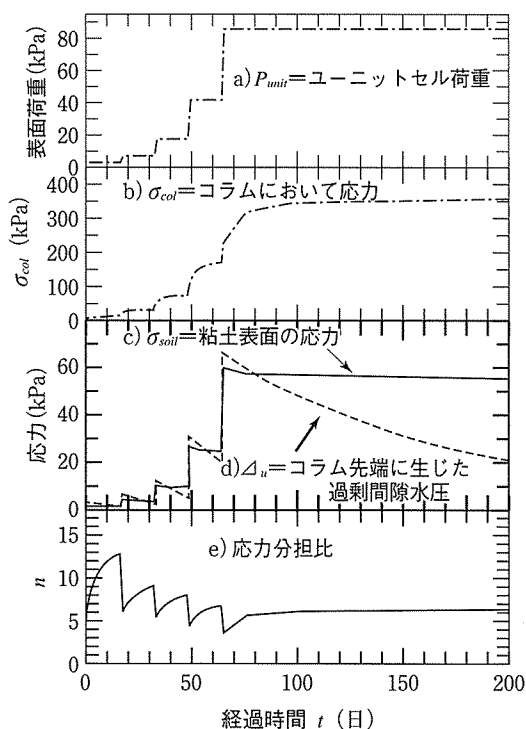


図-9 コラム下過剰間隙水圧と経過時間の関係

ローチ (システム) 工法<sup>3)-5)</sup> の設計におけるコラムの応力分担比に関する上記の各要因について検討を行った。

図-8には、応力分担比-荷重を示している。図によると、フローティング形式のコラムの応力比は、荷重の大きさと密接な関係がある。コラムの支持力は、コラム周

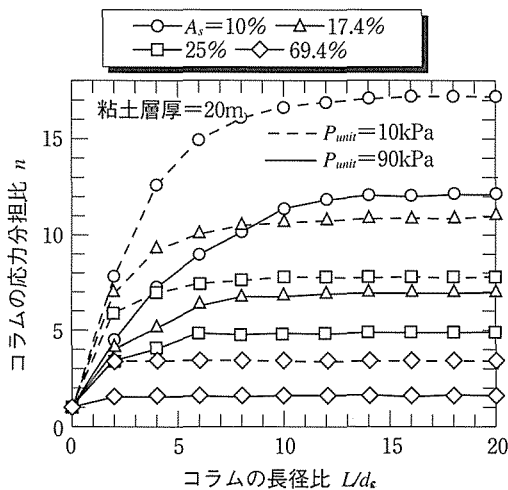


図-10 応力分担比とコラム長径比の関係

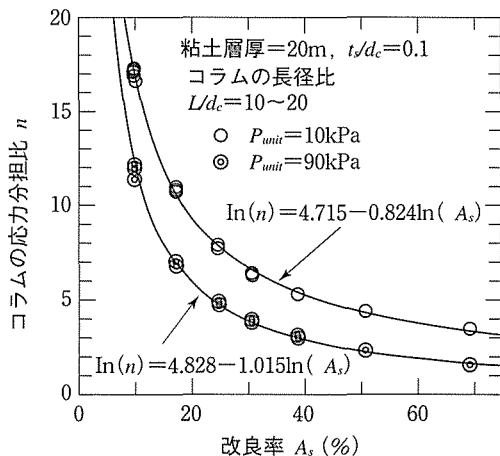


図-12 応力分担比と改良率の定量関係

辺のせん断抵抗と先端支持力の和であり、その値を超える荷重はコラムだけでは支持することができない。また、荷重の増加により応力分担比は一旦急激に減少した後、圧密によって応力分担比がやや増加した。これはコラムの先端下の粘土が圧密され間隙水圧の消散が起こったため(図-9参照)、粘土強度が増加しそれに伴ってコラム分担応力が増加するためと考える。

図-10は、コラムの応力分担比とコラムの長径比関係を示している。フローティング形式のコラムにおいては、コラムの長径比が大きくなるほど応力分担比は増加する

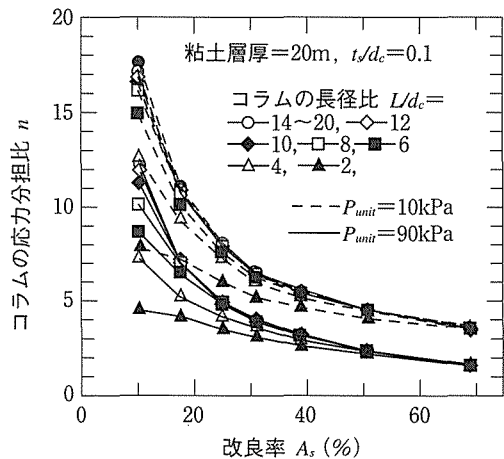


図-11 応力分担比と改良率の関係

ことがわかる。解析した地盤条件および荷重条件では、長径比が10以上になると応力分担比はほとんど変わらないことが分かった。長径比20は着底コラムを意味し、応力分担比から見るとフローティング形式の方が経済的であるといえる。図-11には、応力分担比と改良率の関係を示している。改良率が大きいほどコラム応力分担比は小さくなる。また、コラムの改良率が50%以上では、応力分担比は長径比とは無関係となる。

コラムアプローチ(システム)工法においては、ボックスや橋の横にアプローチコラムの最大長さは厚さ20m地盤に対する普通10m以上である<sup>3)~5)</sup>。これらの条件に対してコラムの応力分担比は、次式で表される。
$$n = \exp(a + bA_s) \quad (4)$$

ここに、 $n$  = コラムの応力分担比。  
 $A_s$  = 改良率(%).  $a$ ,  $b$  = 回帰係数であり、低表面圧力の場合  $P_{unit} = 10\text{kPa}$  (0.5mの低盛土に相当) は  $a = 4.715$ ,  $b = -0.824$  であり、高表面圧力の場合  $P_{unit} = 90\text{kPa}$  (4mの盛土に相当) は  $a = 4.818$ ,  $b = -1.015$  である(図-12参照)。

図-13は、コラムの応力分担比とスラブ厚さの関係を示している。スラブ厚さ比が0.01から0.3に減少すると応力分担比が急

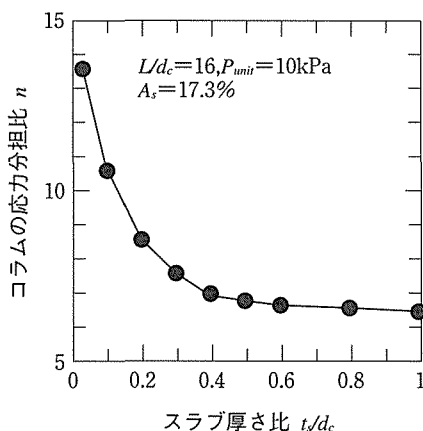


図-13 応力分担比とスラブ厚さ比の関係

激に減少し、スラブ厚さ比が0.4以降はコラムの応力分担比に大きな変化は認められない。

## 5. まとめ

- 1) 複合地盤の沈下量、間隙水圧、土圧について、FEM解析は室内モデル実験をよくシミュレートできる。
- 2) コラム-スラブ系設計基礎に関しては、フローティング形式のコラムの方が有利である。
- 3) コラムの応力分担比はスラブの厚さやコラムの改良率の増加によって指数的に減少し、コラム長径比の増加により増加する。
- 4) コラムの最大長さの計算は、図-12および図-13によってできる。

## 参考文献

- 1) 藤川和之, 三浦哲彦, 別府五男: 低盛土道路の実態調査と交通荷重による圧密沈下の予測, 地盤工学会論文報告集, Vol. 36, No. 4, pp. 147-153, 1996.
- 2) 三浦哲彦, 藤川和之, 坂井晃, 浜武章: 現場性能試験に基づく軟弱地盤上道路の建設費に関する考察, 土木学会論文報告集, 土木学会論文報告集, No. 659/III-52, pp. 253-264, 2000.
- 3) Shen, S. L. and Miura, N.: A technique for reducing settlement difference of road on soft clay, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, C.S. Desai et

al. (eds.), Vol.2, 1391-1394, 2001.

- 4) Shen, S. L., Miura, N., Fujikawa, K. and Yoshida, S.: Reduction of differential settlement between box culvert and road, *Proc. Shanghai 2001*, J.H. Liu et al. (eds.), in Press, Shanghai, 2001.
- 5) 三浦哲彦, 沈水龍, 藤川和之, 浜武章, 植山洋治: 段差緩和システム導入による軟弱地盤上道路のトータルコスト縮減, 道路建設に投稿中, 2001.
- 6) 三浦哲彦, 沈水龍, 古賀勝喜, 中村六史: ソイルセメント改良体打設に伴う周辺粘土の強度変化, 土木学会論文集, No596/III-43, pp. 209-221, 1998.
- 7) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱 (改訂版), p. 324, 1992.
- 8) 内田一郎: 道路舗装の設計法 (新編), 森北出版株式会社, 1976.
- 9) Balaam, N. P. and Booker, J. R.: Analysis of rigid raft supported by granular piles, *Intl. Journal for Num. and Anal. Methods in Geomech.* Vol.5, pp.379-403, 1981.
- 10) Britto, A. M. and Gunn, M. J.: *Critical State Soil Mechanics via Finite Elements*, Ellis Horwood Limited, West Sussex, England, 1987.
- 11) Chai, J.C.: *Interaction Behavior Between Grid Reinforcement and Cohesive-friction Soil and Performance of Reinforced Wall/Embankment on Soft Ground*, Ph.D. Dissertation, AIT, Bangkok, 1992.



## 著者略歴

### 藤川和之

(ふじかわ かずゆき)

1992年 株式会社ダイヤコンサルタント技師長  
1999年 株式会社親和テクノ技師長  
2000年 佐賀大学理工学部非常勤講師  
博士 (工学)



## 著者略歴

### 沈 水龍

(ちん すいりゅう)

1989年 同済大学大学院修士課程修了  
1998年 佐賀大学低平地防災研究センター講師  
2001年 独立行政法人国立環境研究所フェロー  
博士 (工学)